





Chapitre 4-1
Carbonisation
Fabrication du charbon de bois



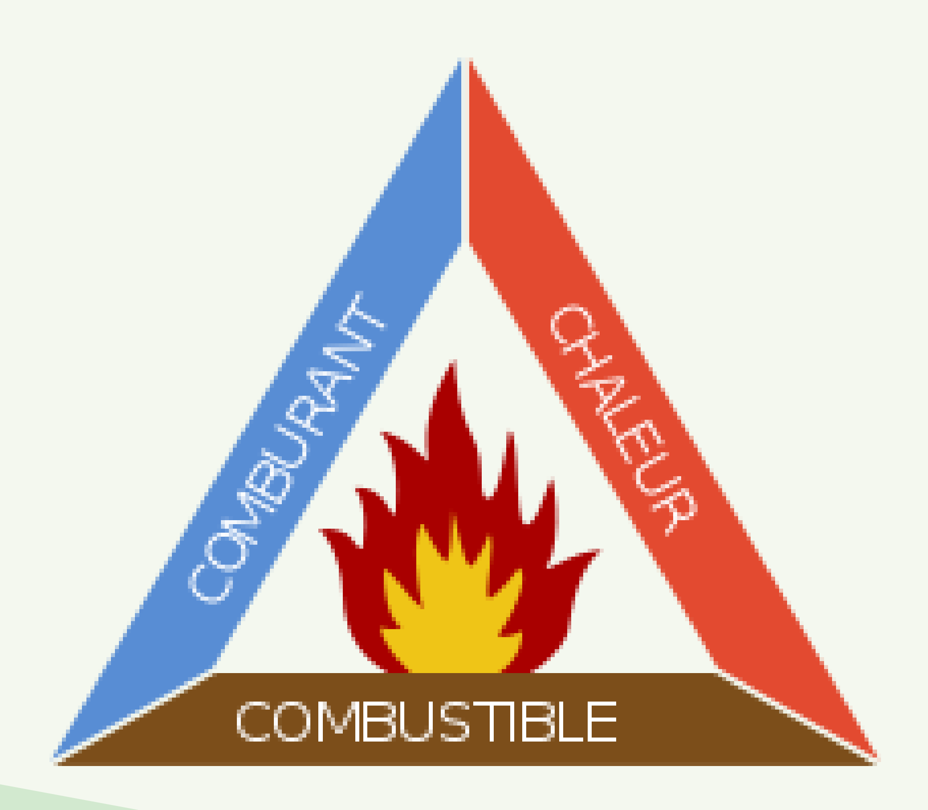
D.Louppe

4.1.1 – La combustion



La combustion est une réaction chimique exothermique d'oxydoréduction

Que faut-il pour que cette réaction se produise ?







Seuls les matériaux sous forme gazeuse peuvent brûler.

donc il faut fournir de l'énergie au solide ou au liquide pour qu'il commence à se vaporiser

Dans le bois chauffé les gaz sont produits par distillation et pyrolyse

Définitions :

- Point éclair : température minimale qui fait exploser un gaz au contact d'une flamme
- Point d'inflammation : température suffisante pour que le feu s'entretienne de lui-même

Divers types de combustion :

- Combustion rapide feu ou explosion)
- Combustion lente (respiration cellulaire)
- Combustion complète (jusqu'à production d'éléments stables)
- Combustion turbulente
- Combustion incomplète (manque de comburant)





Combustion incomplète
(manque de comburant)

Produit des résidus de combustion du bois : cendre et fumées

- Suie – Cendres – particules de carbone
- Monoxyde de carbone (gaz mortel)
- Goudrons
- Oxydes d'azote
- Benzène (cancérigène)
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- Composés organiques volatiles



La combustion du bois



- **Combustion primaire**
  - Le bois brûle en produisant des fumées (eau, gaz carbonique, méthane, composés organiques divers)
  - Plus le bois est humide, plus les fumées sont abondantes et plus les composés organiques sont lourds
  - Le rendement thermique est < ou << 50%
  - Dans les foyers ouverts ou les appareils « au ralenti »

- **Combustion secondaire**
  - Après la phase d'allumage
  - A très haute température, les gaz produits par le bois brûlent en quasi totalité
  - Le rendement thermique est proche de 100%





Teneur en eau du bois

- Pour brûler correctement, le bois doit être sec
- Dans un bois humide, l'énergie dégagée par le feu sert d'abord à sécher le bois
- Un bois sec à l'air a une teneur minimale en eau de 12% sur poids sec (rarement moins)
- La teneur en eau après séchage dépend des conditions climatiques



Le pouvoir calorifique



- Pouvoir calorifique supérieur = énergie dégagée si eau condensée et énergie récupérée
- Pouvoir calorifique inférieur = énergie dégagée directement
- PCS-PCI = chaleur latente de vaporisation de l'eau contenue dans le bois

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) de un kilogramme de bois		
Humidité du bois	PCI en kWh/kg	PCI en Mj/kg
60 % d'humidité	1,7	6,1
20 % d'humidité	4,0	14,4
11 % d'humidité	4,4	15,8
5 % d'humidité	4,5	16,2





Pouvoirs calorifiques de quelques combustibles (ordres de grandeurs moyennes)

Combustibles	PCS(MJ/kg)	PCI(MJ/kg)	PCS/PCI	PCI/PCS
Bois 11%H		15.8		
Bois tropicaux	19,5-21,2			
Carbone pur		34,0		
Charbon de bois		29 à 31		
Charbon	34,1	33,3	1,024	0,977
CO	10,9	10,9	1,000	1,000
Tourbe		20.9		
Méthane	55,5	50,1	1,108	0,903
Gaz naturel	42,5	38,1	1,115	0,896
Propane	48,9	45,8	1,068	0,937
Essence	46,7	42,5	1,099	0,910
Diesel	45,9	43,0	1,067	0,937
Hydrogène	141,9	120,1	1,182	0,846



Combustibles dérivés du bois



- Méthanol : distillation sèche du bois

- Gaz naturel de synthèse :

    - similaire au gaz naturel
    - obtenu par gazéification du bois (800-900°C par vapeur d'eau)
    - améliore le rendement thermique
    - usages multiples
    - la gazéification permet de réduire par 50 (voire 100) les émissions de particules fines



Impact sur l'homme et l'environnement



Bilan carbone du bois énergie

- Neutre théoriquement = CO_2
- Mais il faut déduire « l'énergie grise »
- Si combustion incomplète
  - Méthane CH_4 = 25 x PRG du CO_2
  - Protoxyde d'azote N_2O = 298 x PRG * du CO_2

- KWH produit avec du bois = +/- 42 g eq. CO_2
- KWH produit par le nucléaire = 40-66 g eq. CO_2
- KWH produit avec du fuel = > 400 g eq. CO_2



* PRG = pouvoir de réchauffement global

Bois énergie et pollution



La combustion du bois produit dans les fumées :

- Des suies
- Des poussières fines
- du benzo(a)pyrène (cancérigène)
- Des composés organiques volatils
- Des hydrocarbures aromatiques polycycliques
- Du monoxyde de carbone (mortel)
- Etc.

qui posent d'importants problèmes de santé publique surtout lorsque la combustion est incomplète



Effets sur la santé



- Les risques sanitaires (problèmes respiratoires, cancers du poumon) sont plus importants qu’avec les produits pétroliers dont la combustion est plus complète

Émissions françaises de quelques polluants (% en masse) pour l'année 2009

	PCEF	CO	PM10	PM2,5	PM1,0	HAP	COVNM
Bois énergie	3 %	32,1	21	33	59	62	20,3
Fioul domestique	?	2,2	4,6	7,4	12	5,2	2,7
Gaz naturel	21 %	0,79	0,28	0,44	0,80	~ 0	1,3
Transports	31 %	22,1	12	13	19	26	18,2

PCEF : Participation à la consommation d'énergie finale
CO : Monoxyde de carbone ;
PM10 : particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètres ;
PM2,5 : particules d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres, appelées « particules fines » ;
PM1,0 : particules d'un diamètre inférieur à 1,0 micromètre, appelées « particules très fines » ;
HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques (COV hors méthane), dont le benzène ;



4.1.2 – La carbonisation



- Produit à faibles distances
- Facile à transporter
- Contient 2 X plus d'énergie que le bois / kg
- Combustion régulière
- Dégage peu de fumées (mais bcp de CO)





Utilisations du charbon de bois

- Historiquement :
  - Forges
  - Fonderies
  - Verreries
- Maintenant :
  - Industrie chimique
  - Industrie métallurgique
  - Industrie électrométallurgique

Propriétés du charbon de bois

- Réductrice
- Absorbantes
- Déshydratantes
- Le gaz produit à partir du charbon est un gaz propre (pas de goudrons) utilisable dans les moteurs diesels



La carbonisation



- La pyrolyse est la décomposition thermique de la cellulose et de la lignine pour donner du charbon de bois. Elle se produit dans un espace fermé où l'entrée d'air est contrôlée afin que le bois ne soit pas brûlé et réduit en cendres, mais donne du charbon de bois.

- L'air n'est pas nécessaire dans le processus de pyrolyse et les techniques les plus évoluées de fabrication de charbon de bois ne comportent aucune admission d'air, ce qui améliore le rendement (pas de bois brûlé) et la qualité.

- Le processus de pyrolyse ne démarre que lorsque le bois a été porté à une température d'environ 300°C. Une fois amorcé, il se poursuit de lui-même en dégageant une quantité de chaleur considérable.





- Dans le processus traditionnel de carbonisation (meule ou four), une partie du bois est brûlée pour à la fois sécher le reste de la charge et élever la température jusqu'à l'amorçage de la pyrolyse qui, ensuite, se poursuivra d'elle-même.

- Dans les fours continus la chaleur dégagée par la pyrolyse permet de produire du charbon de bois de haute qualité avec un rendement élevé.

- Les gaz combustibles qui se dégagent du bois lors de la pyrolyse sont brûlés pour fournir un apport de chaleur compensant les pertes par les parois et autres parties du four et pour sécher le bois entrant.



Etapes de la carbonisation

Capitalisation MAKALA




Capitalisation
MAKALA
cirad



cirad



cirad



cirad



cirad


Capitalisation
MAKALA


cirad


Capitalisation
MAKALA
cirad

Etapes de la carbonisation



- Jusqu'à 160°C le bois ne perd pratiquement que de l'eau.
- Jusqu'à 200 °C, le bois brunit, perd encore son humidité et son hygroscopicité, de l'acide acétique et quelques composés volatils entraînés par la vapeur d'eau.
- de 200 °C à 270-280 °C, se dégagent des gaz oxygénés : CO, CO_2, vapeur d'eau, acide acétique, méthanol. Le résidu n'est pas encore du charbon, mais du bois roux (appelé aussi bois torréfié).

- A partir de 270-280 °C, le bois commence à se décomposer spontanément en une réaction exothermique incontrôlable qui élève la température, sans apport extérieur de calories, jusque vers 350°-380°C pour donner du charbon de bois (carbonisation), plus encore des gaz oxygénés, mais en plus faibles quantités, et des hydrocarbures de poids moléculaire peu élevé (méthane, éthane, éthylène).



- Entre 270 et 380 °C, la formation de méthanol, d'acide acétique etc . est accompagnée d'autres composés chimiques plus complexes, principalement sous forme de goudrons légers.

- Le processus se poursuit jusqu'à ce que tout le bois est transformé en charbon de bois et le processus s'arrête. Le charbon de bois ainsi produit a une teneur de 65-70(-80)% de carbone pur 3 à 5% de cendres. Les résidus goudronneux peuvent atteindre 30%.

- Si l'on chauffe pour que la température dépasse 400°C, la teneur en carbone pur augmente avec la décomposition d'une plus grande proportion des goudrons.

- Les gaz formés sont principalement constitués par des hydrocarbures et parallèlement le pyroligneux s'enrichit en goudrons lourds.



- Une température de 500°C donne une teneur en carbone pur d'environ 85%, et une teneur en éléments volatils de 10%.

- Le rendement en charbon de bois à cette température est d'environ 33% du poids du bois anhydre - compte non tenu du bois brûlé pour lancer la carbonisation et augmenter la température au-delà de 400°C.

- Si l'on continue à chauffer au-dessus de 500 °C jusqu'à 700 °C, il se produit une phase de dissociation : les gaz produits sont moins importants, mais contiennent de plus en plus d'hydrogène si l'on élève encore la température de 700°C à 900°C. Ce départ d'hydrogène entraîne un enrichissement relatif en carbone (jusqu'à 90-95 %).





Composition et rendement pondéral du charbon de bois en fonction de la température atteinte pendant la carbonisation

Température de carbonisation (°C)	Composition du charbon de bois		Rendement charbon/bois à 0%H
	% carbone pur	% matières volatiles	
bois torréfié (200-275°)*	31	68	74
300°	68	31	42
500°	86	13	33
700°	92	7	30

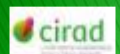
Pouvoir calorifique supérieur de combustibles dérivés du bois

Combustible	Pouvoir calorifique supérieur (kJ/kg)
Charbon de bois	27 200 à 33 500
Bois torréfié	23 800
Bois anhydre	19 250 à 20 100
Bois sec à l'air	15 500 à 15 900
Bois vert	9 200 à 10 050



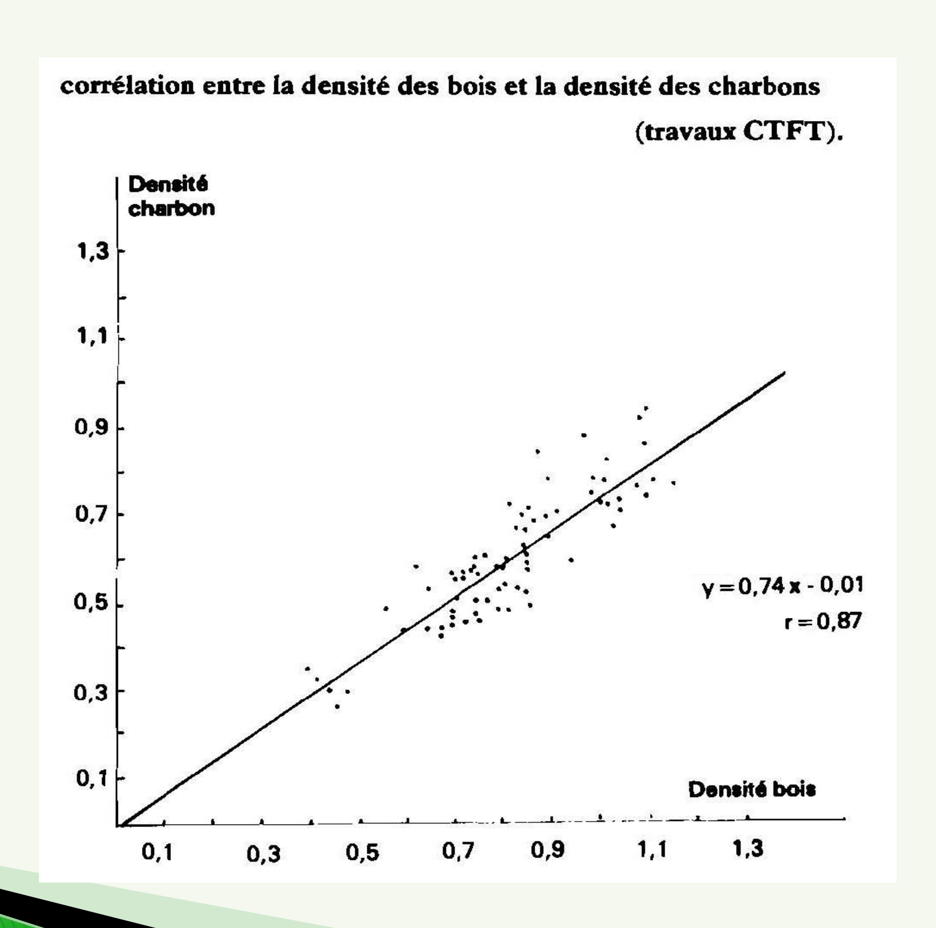


Échantillon	Mélanges feuillus tempérés	Gmelina arborea	Eucalyptus hybride 12 ABLx saligna	Mélanges feuillus tropicaux
Provenance	France	Côte d'Ivoire	Congo	Gabon - C.I. Équateur - Guyane
Résultats de carbonisation				
Rendement en charbon (% bois sec)	30,1	30,6	32,4	32 à 35
Rendement en pyroligneux (% bois sec)	53,1 (dont 6,8 de goudron)	50,1 (dont 9,2 de goudron)	49,7 (dont 8,3 de goudron)	43 à 51 (dont 5 à 9 de goudron)
Gaz totaux (litres pour 100 g bois sec)	15,1	17,7	14,7	15 à 15,5
Composition du pyroligneux (% bois sec)				
Methanol	1,4	1,94	1,84	1,1 à 1,4
Ethanol + acide formique	0,09	0,04	0,10	0,03
Acétone	0,15	0,11	0,11	0,11 à 0,13
Acetate de méthyle	0,76	0,56	0,32	0,2 à 0,6
Acide acétique	3,62	2,44	2,35	1,9 à 3,8
M.E. cétone	0,17	0,15	0,13	0,15
Gaïacol	0,42	0,29	0,61	0,2 à 0,7
Phénol + o cresol	0,58	0,07	0,37	0,2 à 0,5
m + p cresol	0,13	0,05	0,19	0,1 à 0,3
Composition des gaz (% bois sec)				
H_2	0,03	0,03	0,02	0,01 à 0,03
O_2	0,10	—	0,42	0,33 à 0,56
CO_2	14,0	15,7	14,1	13,0 à 15,1
CO	5,7	7,35	5,55	5,4 à 6,0
CH_4	1,21	1,36	0,98	0,8 à 1,65
C_2H_4	0,07	0,10	0,09	0,08 à 0,11
$C_3H_6 + C_4H_9$	—	0,21	0,19	0,2 à 0,4
C_2H_6	0,21	0,27	0,20	0,2 à 0,33
C_3H_8	—	—	—	0 à 0,14
C_2H_2	—	—	—	—





Au cours d'une carbonisation lente, les composés ont le temps de se former puis de réagir les uns sur les autres ou de s'auto-polymériser lors de réactions secondaires. Mais si la carbonisation est très rapide, le charbon de bois produit est moins dense et beaucoup plus friable.







rendement en kg/stère en fonction de l'humidité du bois

Rendement
kg/stère

120
100
80
60
40
20

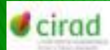
Taux d'humidité
(sur matière anhydre)

0 20 40 60 80 100 120

La durée de carbonisation augmente avec la grosseur des bois. Les procédés traditionnels avec un cycle de carbonisation très long (fosses, meules, fours en briques, de plusieurs dizaines de m^3) permettent de carboniser des bois > 50 cm de diamètre



Capitalisation
MAKALA



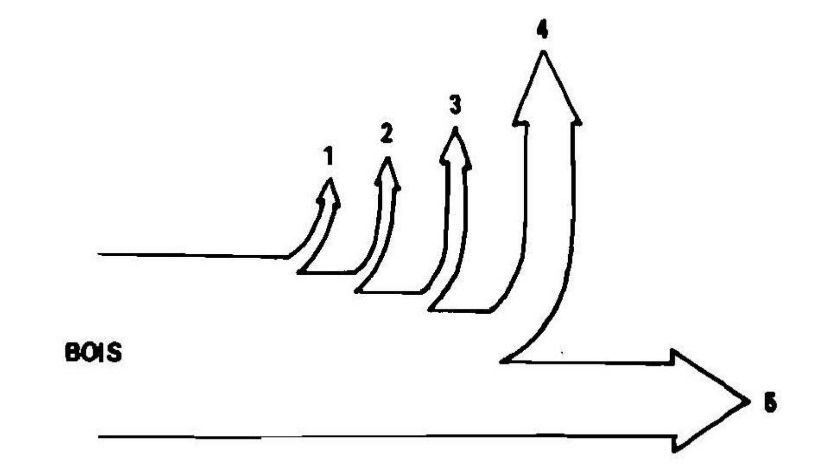
Les différents modes de carbonisation



La réaction de carbonisation est d'abord endothermique, puis exothermique, puis endothermique. Il faut donc chauffer pour que la réaction démarre.

• la **carbonisation par combustion partielle** : l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la charge (fosses, meules, fours métalliques ou en briques)

Bilan énergétique < 50%







• la **carbonisation par chauffage externe** : l'énergie nécessaire est fournie à la charge par un foyer de chauffe externe par l'intermédiaire d'une surface d'échange (vase clos, cornue)

• la **carbonisation par contact de gaz chauds**: l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par des gaz chauds provenant d'un foyer externe et mis en contact direct avec la charge.

Pour les deux derniers modes, les produits de pyrolyse (gaz et condensables) sont récupérés dans les foyers de chauffe.



3.1.3 La production de charbon de bois



Par ordre chronologique

- Production du bois (plantation, gestion, aménagement durable)
- Récolte du bois (exploitation, éclaircies, récupérations bois abandonné en forêt)
- Séchage et conditionnement du bois (sciage en billons de longueur homogène)
- Carbonisation
- Désenfournage, criblage (élimination des impuretés et des poussières), entreposage et ensachage
- Transport du charbon de bois vers un dépôt ou un point de distribution.



Coûts de production



- Prix de revient du bois rendu sur le lieu de carbonisation, y compris coûts financiers
- Coût de la main d'œuvre pour la carbonisation, y compris chargement et déchargement de la meule
- Ensachage : personnel, fourniture sacs
- Coût du transport du charbon de bois vers les principaux marchés ou points de distribution
- Coûts du capital d'exploitation
- Coûts d'investissements fixes d'équipement.





Main d'oeuvre

Travail	Temps (minutes)		Coût par sac de charbon (F.cfa 1998)
	Par stère de bois	Par sac de charbon	
Abattage	Non comptabilisé		-
Tronçonnage	19 minutes	14 minutes	75
Débardage	36 minutes	27 minutes	118
Montage du four métallique	Non comptabilisé		-
Enfournement	86 minutes	64 minutes	315
Surveillance	Non comptabilisé		-
Défournement ensachage	82 minutes	61 minutes	290
Total partiel coût de main d'œuvre			797

Amortissement matériel

Rubrique	Coût par sac de charbon (F.cfa)
Four métallique (amortissement)	127
Tronçonneuse (amortissement)	98
Entretien tronçonneuse et matériel	490
Carburant, lubrifiant.	185
Sacs à charbon + petit matériel	135
Total	1035



Tirage direct ou tirage inversé ?



FUMEE

AIR

AIR

TIRAGE DIRECT

FUMEE

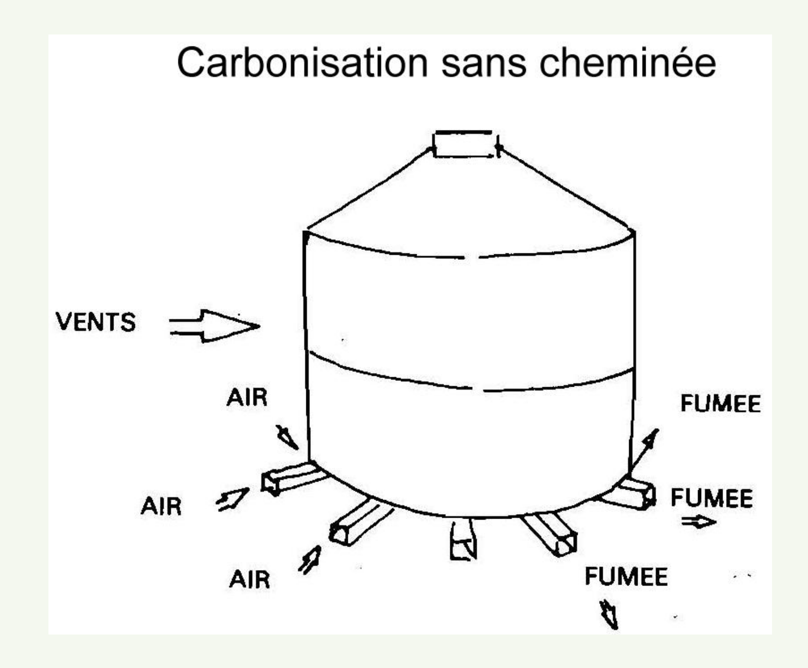
AIR

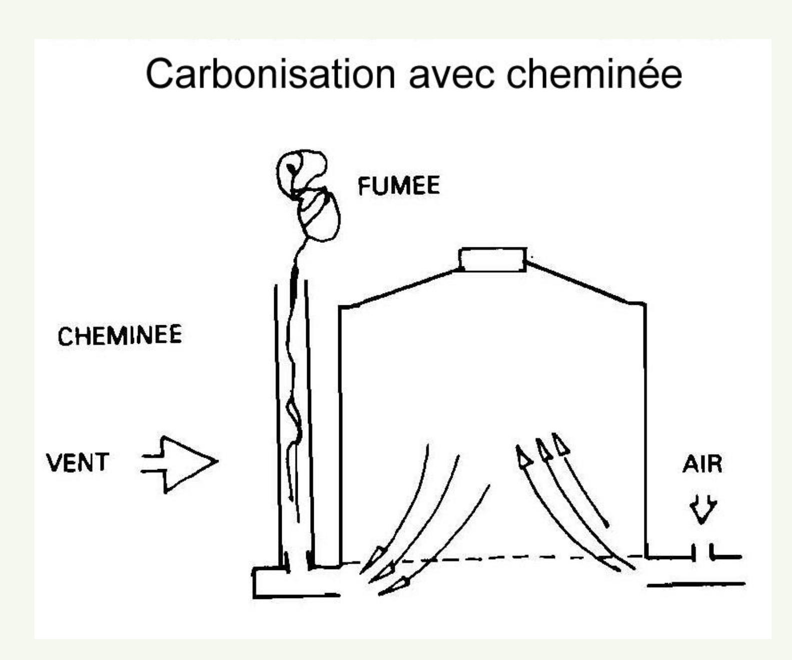
TIRAGE INVERSE



Tirage inversé







Règles générales à respecter:

l'air doit pénétrer uniformément dans la charge pour une combustion homogène

les bois doivent être d'une grosseur la plus homogène possible

l'allumage est fait avec du petit bois

le mélange de plusieurs essences est à éviter

l'enveloppe du four doit être aussi étanche que possible à l'exception des évents (ouvertures d'admission d'air et de sortie des fumées)



Conduite de la carbonisation



La grille permet une libre circulation de l'air et des gaz de carbonisation à l'intérieur de la charge. Elle est posée à même le sol.

Le mode de chargement est conditionné par la forme du four .
L'enceinte doit être étanchéifiée par une opération appelée lutage. Celle-ci consiste à éviter toute entrée d'air autre que celles prévues à la base du four (évents).

TERRE

ENTREE D'AIR

COUPE LONGITUDINALE D'UNE FOSSE CLASSIQUE



L'allumage de la charge s'effectue avec du petit bois, des brindilles ou des braises.
Le tirage est activé par des ouvertures situées à la base et à la partie supérieure du four de telle sorte que le feu se développe rapidement. La température monte et l'eau du bois se vaporise et forme de la **fumée blanche**. La durée de cette phase est fonction de l'humidité du bois.

Développement de la zone de carbonisation
On laisse monter la température à l'intérieur du four. Une zone très chaude se développe à l'endroit où les gaz sont les plus chauds ce qui porte le bois à la température de carbonisation. Cette température est atteinte lorsque la **fumée devient jaunâtre, très dense et d'une odeur légèrement vinaigrée** (dégagement d'acide acétique).

Propagation de la zone de carbonisation
La carbonisation étant amorcée, le charbonnier doit la propager aussi uniformément que possible à l'ensemble de la charge en favorisant les entrées d'air dans les zones les moins chaudes et en obturant les évents dans les zones trop chaudes.





Carbonisation

Dès que la zone de carbonisation est bien développée, il faut réduire les entrées d'air et les sorties de fumée.

L'objectif est de conserver une température supérieure à la phase exothermique. Il est donc important de surveiller attentivement la progression du front de carbonisation.

Lorsque l'allumage est effectué à l'une des extrémités du four, le front de carbonisation se propage en demi-éventail à partir du point d'allumage.

La mise à grand feu

Dans certains procédés (exemples: four métallique, meule), une ouverture importante des évents pendant un temps très court (mise à grand feu) permet de carboniser les incuits (bois qui n'a pas été portée à une température suffisante pour en assurer une bonne carbonisation). En élevant la température de façon conséquente, ce procédé permet aussi d'augmenter le taux de carbone fixe.

L'extinction

Une **fumée bleue et transparente se dégage l**orsque la carbonisation est terminée. Tous les orifices sont hermétiquement fermés.





Merci de votre attention



Reconstruire collectivement l'objet de l'intervention, et s'assurer de sa pertinence comme de son caractère appropriable aux problèmes locaux

(CARON ET CHEYLAN, 2008)

Auteurs : Louppe Dominique *

•CIRAD UPR BSEF http://ur-bsef.cirad.fr/ Campus international de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5 (France) (dominique.louppe@cirad.fr)